

Fig. 2 Hybrid control system of position and force using acceleration controller

$$T_{\text{true}} = T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} - T_g - D\omega - F \quad (13)$$

したがって、トルクオブザーバーを用いて外力  $T_{\text{ext}}$  を推定すると、重力や障害などの反力  $T_{\text{true}}$  の外力の項を求めなければ、反力  $T_{\text{true}}$  を推定できることがわかる。

#### 4. ロボットのパラメータの同定

##### 4.1 ロボットの動力学方程式

ここで、ロボットマニピュレータの動力学方程式について考えてみる。本論文では、最も基本的な垂直3関節DDロボットマニピュレータを扱い、これをFig. 4(a)に示す。このロボットのパラメータはFig. 4(c)のようにになら、その動力学方程式を求めるところ(4)式のように表される。<sup>[11,16]</sup>

$$\begin{aligned} \tau &= M(\theta)\dot{\theta} + B(\theta)\underbrace{[\omega][\omega]}_{+D\omega+F} + C(\theta)[\omega] + T_g(\theta) \\ &\quad + D\omega + F \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{\ddot{\theta}_{i+1}}{T_{d,i+1}} = \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 + \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 - F(s)}} \quad (10)$$

$$(11)$$

$$\frac{\ddot{\theta}_1}{T_{d,1}} = \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 + \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 - F(s)}} \quad (12)$$

$$(13)$$

$$\frac{\ddot{\theta}_1}{T_{d,1}} = \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 + \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 - F(s)}} \quad (14)$$

$$\frac{\ddot{\theta}_2}{T_{d,2}} = \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 + \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 - F(s)}} \quad (15)$$

$$\frac{\ddot{\theta}_3}{T_{d,3}} = \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 + \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 - F(s)}} \quad (16)$$

$$(17)$$

多関節ロボットマニピュレータの各関節に設置されたアクチュエーターには、その動作時に(12)式に表されるような外力  $T_{\text{ext}}$  が印加される。ここで、 $T_{\text{int}}$  は直心力、 $T_g$  は重力、 $T_{\text{true}}$  はカヤコオリ力からなる干渉力、 $F$  はクリープ摩擦である。

(12)式より、反力  $T_{\text{true}}$  は(13)式のよう求めることが出る。

$$T_{d,1} = T_{\text{ext}} + T_g + T_{\text{true}} + D\omega + F \quad (18)$$

April, 1993

日本ロボット学会誌 11巻3号

1993年4月

(a) Schematic diagram of tested three-degrees-of-freedom DD robot manipulator

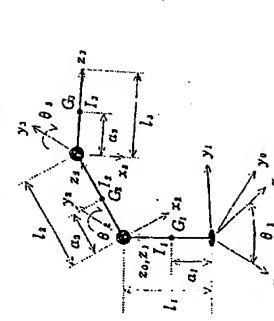


Fig. 3 Block diagram of torque observer

$$H(s) = F(s)P_m(s) \quad (9)$$

ここで、 $\omega_n$  はトルクオブザーバーの固有振動数で、これにより外力  $T_{\text{ext}}$  の推定速度を定める固有振動数で、これにより外力  $T_{\text{ext}}$  の出力  $T_{\text{des}}$  の出力と  $H(s)$  の出力の関係を  $\omega_n$  とおくと、アチニエーダに加わる実際の外力  $T_{\text{ext}}$  から  $\dot{T}_{\text{des}}$  までの伝達関数は(10)式のように表すことができる。しかし、ロバースティック  $F(s)$  の周波数範囲内では、(10)式は(11)式のようになる。

$$H(s) = \frac{F(s)P_m^{-1}(s)P(s)}{1 - F(s)} \quad (10)$$

$$(11)$$

多関節ロボットマニピュレータの各関節に設置された

アクチュエーターには、その動作時に(12)式に表されるカヤコオリ力からなる干渉力、 $T_g$  は重力、 $T_{\text{true}}$  はクリープ摩擦である。

(12)式より、反力  $T_{\text{true}}$  は(13)式のよう求めることが出る。

$$T_{d,1} = T_{\text{ext}} + T_g + T_{\text{true}} + D\omega + F \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= D\dot{\theta}_1 + D\dot{\theta}_m s_1 - r_g s_{12} + D_s \omega_1 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_1 \\ \tau_2 &= -r_g s_{12} - r_g s_{13} + D_s \omega_2 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_2 \\ \tau_3 &= -r_g s_{13} + D_s \omega_3 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_3 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= D\dot{\theta}_1 + D\dot{\theta}_m s_1 - r_g s_{12} + D_s \omega_1 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_1 \\ \tau_2 &= -r_g s_{12} - r_g s_{13} + D_s \omega_2 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_2 \\ \tau_3 &= -r_g s_{13} + D_s \omega_3 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_3 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} R(\theta) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ J_{11} + J_{22} s_{12} + 2 r_g s_{12} c_{12} & J_{12} + r_g c_{12} & J_{13} \\ J_{21} + r_g s_{12} & 0 & 0 \\ 2 J_{22} s_{13} - 2 r_g s_{13} c_{13} & 0 & -2 r_g s_{13} \end{bmatrix} \\ C(\theta) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -J_{12} s_{13} c_{13} - J_{13} s_{13} c_{13} - r_g s_{13} c_{13} & 0 & 0 \\ -J_{12} s_{13} c_{13} + J_{13} s_{13} c_{13} & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= D\dot{\theta}_1 + D\dot{\theta}_m s_1 - r_g s_{12} + D_s \omega_1 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_1 \\ \tau_2 &= -r_g s_{12} - r_g s_{13} + D_s \omega_2 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_2 \\ \tau_3 &= -r_g s_{13} + D_s \omega_3 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_3 \end{aligned} \quad (18)$$

また、リンク3の等角速度運動において、位置  $\theta_3$  が0 [rad] のときの入力トルク  $T_3$  の大きさが摩擦力と等しくなることがわかる。同時に、リンク2では  $\theta_2 = 0$  として等角速度運動させると、次に、リンク3では  $r_g \dot{\theta}_3 + r_g \ddot{\theta}_3$  が求められる。すると  $r_g \dot{\theta}_3 + r_g \ddot{\theta}_3$  は最初に求めた値であるため、 $r_g \dot{\theta}_3$  を求めることができる。<sup>[19]</sup>

この式からわかるように、リンク2とリンク3との大きさが0 [rad] のときには等角速度運動させると、重力は位置  $\theta$  に関する常数である。そのため、等角速度運動時の位置  $\theta$  と入力トルク  $T$  の関係を規定し、その元速度の振幅を求めて無効にするべ

—169—

$$(b) Parameter of tested DD robot manipulator$$

$$\begin{aligned} I_i &= \begin{bmatrix} m_i & 0 & 0 \\ 0 & I_{i1} & I_{i2} \\ 0 & I_{i2} & I_{i1} \end{bmatrix} : \text{moment of inertia of link } i \\ l_i & : \text{length of link } i \\ a_i & : \text{length between joint } i \text{ and the center of gravity of link } i \\ m_i & : \text{mass of link } i \\ I_i & : \text{length of link } i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{11} &= I_{11} + I_{22} + m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2 \\ J_{12} &= I_{12} + I_{23} + m_2 a_2^2 + m_3 l_2^2 \\ J_{22} &= I_{22} + I_{33} + m_3 a_3^2 \\ J_{13} &= I_{13} + I_{23} + m_2 a_2 l_2 \\ J_{23} &= m_2 a_2 l_2 + m_3 l_3 \\ r_1 &= m_1 a_1 \\ r_2 &= m_2 a_2 \\ r_3 &= m_3 a_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= D\dot{\theta}_1 + D\dot{\theta}_m s_1 - r_g s_{12} + D_s \omega_1 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_1 \\ \tau_2 &= -r_g s_{12} - r_g s_{13} + D_s \omega_2 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_2 \\ \tau_3 &= -r_g s_{13} + D_s \omega_3 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_3 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= D\dot{\theta}_1 + D\dot{\theta}_m s_1 - r_g s_{12} + D_s \omega_1 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_1 \\ \tau_2 &= -r_g s_{12} - r_g s_{13} + D_s \omega_2 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_2 \\ \tau_3 &= -r_g s_{13} + D_s \omega_3 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_3 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= D\dot{\theta}_1 + D\dot{\theta}_m s_1 - r_g s_{12} + D_s \omega_1 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_1 \\ \tau_2 &= -r_g s_{12} - r_g s_{13} + D_s \omega_2 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_2 \\ \tau_3 &= -r_g s_{13} + D_s \omega_3 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_3 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= D\dot{\theta}_1 + D\dot{\theta}_m s_1 - r_g s_{12} + D_s \omega_1 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_1 \\ \tau_2 &= -r_g s_{12} - r_g s_{13} + D_s \omega_2 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_2 \\ \tau_3 &= -r_g s_{13} + D_s \omega_3 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_3 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= D\dot{\theta}_1 + D\dot{\theta}_m s_1 - r_g s_{12} + D_s \omega_1 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_1 \\ \tau_2 &= -r_g s_{12} - r_g s_{13} + D_s \omega_2 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_2 \\ \tau_3 &= -r_g s_{13} + D_s \omega_3 + D_{ret} \operatorname{sgn} \omega_3 \end{aligned} \quad (23)$$

この等角速度試験を色々な角速度によって行うことによ

日本ロボット学会誌 11巻3号

1993年4月



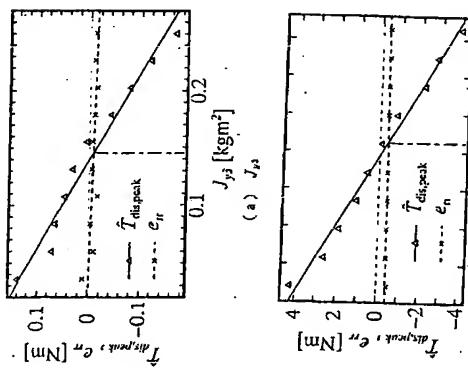


Fig. 6 Schematic diagram reaction force estimation system

### 6. ハイブリッド制御の実験結果

実験には、Fig. 4 (a) に示す垂直 3 脚筋 DD ロボットマニピュレーターを用いた。実験のハードウェアはアシストデュームは Fig. 11 に示される。制御系は全て DSP (ADSP 77290) のソフトウェアフルゴリズムにより構成されている。先述のパラメータの同定試験でも同様のシステムを用いている。

Fig. 12 のように停止した燃費に対する位置と力のハイブリッド制御の結果を示す。燃費に用いた  $I_f$  加速度コントローラの燃費関数  $S(I_f)$  と相間燃費関数  $T(I_f)$  の周波数特性は Fig. 13 に示す。実験は  $x$  方向に力制御、 $y, z$  方向に位置制御を行った。力指令  $P^{ref}$  として 1 [Hz] の方形波を与え、位置指令  $P^{ref}$  として  $x$  方向にマニピュレータの先端に設置された力センサと同時に、環境に加えられた力を求めることができる。

以上より求められた反応力の推定値を、Fig. 4 で示される力センサからのフィードバック信号の代わりに用いることで、力センサを用いない位置と力のハイブリッド制御系を実現することができる。Fig. 10 にそのプロック図を示す。

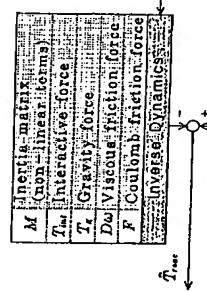


Fig. 7 Reaction force estimation system

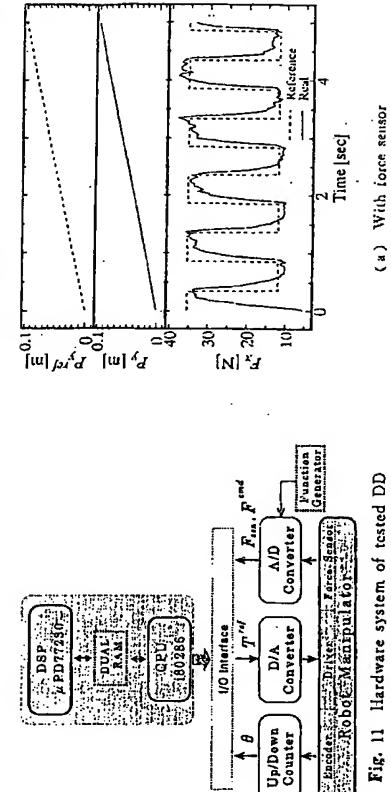


Fig. 8 Schematic diagram of hybrid control system

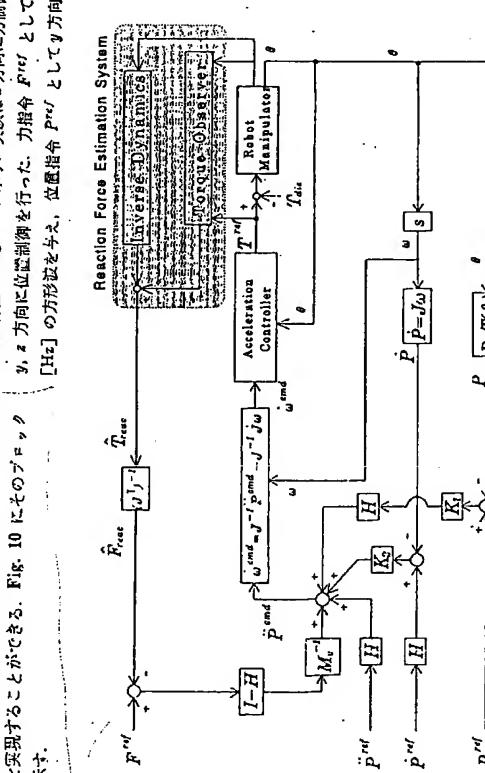
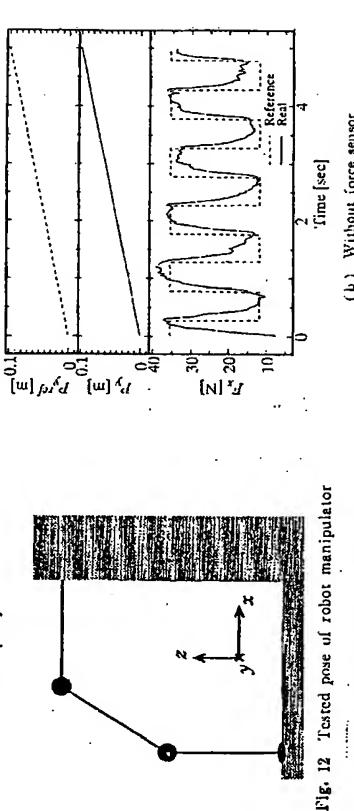


Fig. 10 Hybrid control system of position and force without force sensor

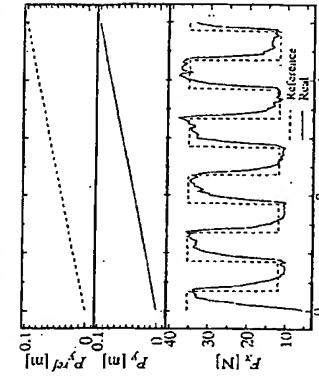


Fig. 11 Hardware system of tested DD robot manipulator

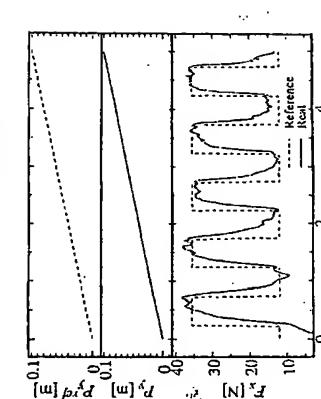
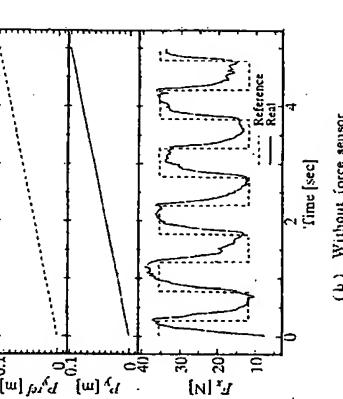


Fig. 13 Frequency characteristics of experimental  $H^*$  acceleration controller

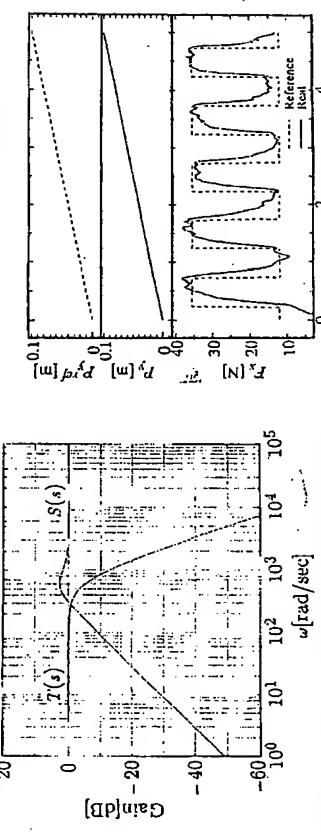


Fig. 14 Experimental results of hybrid control of position and force

Fig. 14 (c) には力センサを用いない場合の結果を、Fig. 14 (b) に力センサを用いない場合の結果を示す。そして、を考慮しない場合 ( $T_{int}=0$ ) の結果を示す。その結果

より、力センサを用いない場合と力の応答は所望のものが得られることが多い。また、干涉力を考慮しない場合と何ら変わらない結果が得られる。これは、力制御のように動作の遅延では、干涉力による影響が無視できるほど小さいためであると考えられる。なお、実験のソフトウェアのサンプリング時間は [Insec] で、トルクアブザーブの  $\beta(s)$  の固有振動数  $\omega_n$  は  $100[\text{rad/sec}]$  である。また、フィードバック定数  $K_1$  と  $K_2$  は前者  $10$  である。実験に使用した力制御の環境は終であり、装置供給の安定性は定数  $K_3$  のこの値によって充分保たれる。

### 7. まとめ

本論文では、まず、 $H^\infty$  制御に基づき系統的に設計した  $H^\infty$  加速度コントローラを用いて高性能な位置と力のハイブリッド制御系を構成した。次に、トルクアブザーブを用いて反応推定機構を構成することにより、力センサを必要としない位置と力のハイブリッド制御系を実現した。本論文の実験結果より、提案するカセシサを用いない位置と力のハイブリッド制御系が所望の応答を実現し、有效地に機能することを確認した。

提案するハイブリッド制御系はカセシサを必要としないため、従来のカセシサを用いた場合のハイブリッド制御系との操作上の利便性を強く仄つて比較して、マニピュレータの操作上の利便性を強調する。また、本論文では、ロボットマニピュレータのパラメータをトルクオブザーバによって同定するので、同定・設計・制御を通じて、カセシサを活用しない方法を提案している。

### 参考文献

- 1) M. Raibert, et al.: "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.102, No.2, pp.126-133, 1980.
- 2) C.H. An, et al.: "Model-Based Control of A Robot Manipulator", The MIT Press, 1988.
- 3) 寺川：「ロボットの力学と制御」，朝倉書店，1990。
- 4) 寺川：「ロボット機器設計」，ニッソウ，1986。
- 5) 斎田 他：「力覚制御に基づく多自由度ロボットの力-ドライブ制御」，電子論文，109巻，5号，pp.325-332, 平成5。
- 6) 大石他：「DD アクチュエータの力とコントライアンスのロボット制御」，電子論D, 110巻, 11号, pp.1133-1140, 平成2-11。
- 7) 大石 他：「立體情報処理を用いたマニピュレータのジョグシングコントロール」，日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6, pp.798-805, 1992。
- 8) 大石 他：「モデル化された位置制御系によるマニピュレーター」，第1回国日本ロボット学会コボットシンポジウム, No.106, 平3-5。
- 9) 大石 他：「H $^\infty$ -制御に基づくセンサレス力制御」，電学論, 112巻, 9号, pp.852-861, 平4-9。
- 10) 斎田 他：「内外センサ情報を用いたその利用に対する検討」，第9回国日本ロボット学会研究発表会, No.1352, 平3-11。
- 11) 斎田 他：「カセシサを用いたハイブリッド・ドライバ・マニピュレータのインピーチメント制御」，日本ロボット学会誌, 7巻, 3号, pp.60-71, 平元-6。
- 12) 伊多：「ロボット制御」，花學社, 110巻, 8号, pp.649-652, 平2-8。
- 13) 生藤 他：「柔軟トルクオブザーバを用いたハイブリッド制御」，電学論 D, 112巻, 2号, pp.181-182, 平4-2。
- 14) 大石 他：「次世代制御器による地盤測量機器の一概観」，電学論 B, 104巻, 6号, pp.373-379, 平3-6。
- 15) J.J.Craig: "Introduction to Robotics, Mechanics & Control", ADDISON WESLEY, 1986.
- 16) 美多 他：「ロボット制御工学入門」，コロナ社, 1989。

大石 浩 (Kiyoshi OHISHI)

宮崎 昌 (Masaru MIYAZAKI)

1957年10月14日生。1986年3月慶應義塾大学大学院工学研究科計算機科学専攻修了。同年4月大阪工業大学建築工学科修士課程修了。1989年4月同大学助教就任。1993年4月同大学工学院工学研究科修士課程修了。在学中は、主として、ロボットのセミナーの開催等の研究に従事。UNIB、が測量的制御学会、システム制御技術学会、電子学会、日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

藤田昌弘 (Masahiro FUJITA)

1968年3月16日生。1991年3月大阪工業大学工学部建築工学科卒業。1993年3月、同大学大学院工学研究科修士課程修了。在学中は、主として、ロボットのセミナーの開催等の研究に従事した。